第 36 卷 第 3 期 中国腐蚀与防护学报 Vol.36 No.3
2016年 6 月 Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection Jun. 2016

SRB对X70管线钢在近中性pH溶液中腐蚀行为的影响

宋博强 陈 旭 马贵阳 刘 睿

辽宁石油化工大学石油天然气工程学院 抚顺 113001

摘要：采用电化学阻抗、动电位极化及微观观察法，对比了有、无硫酸盐还原菌 (SRB) 的情况下X70管线钢在近中性pH溶液 (NS4) 中的腐蚀行为，研究了SRB生长周期对X70钢腐蚀行为的影响。结果表明：X70钢在无菌溶液中腐蚀速率随时间增加呈单一增大的趋势。SRB在NS4溶液中的生长周期分为对数繁殖期 (1~3 d)，稳定生长期 (4~7 d) 和衰亡期 (7~14 d) 3个阶段。SRB对X70钢在NS4溶液中腐蚀速率的影响与其在溶液中生长规律有关：当SRB处于对数繁殖期和稳定期时，X70钢表面覆盖一层致密的生物膜，对钢起到了保护作用，此时X70钢的腐蚀速率比无菌条件下低；当SRB进入衰亡期，X70钢腐蚀的程度比无菌介质中严重，钢表面腐蚀产物逐渐增多，生物膜出现破裂，腐蚀速率增大。

关键词：X70管线钢 硫酸盐还原菌 生长周期 电化学腐蚀

中图分类号：TG142.71 **文献标识码：**A **文章编号：**1005-4537(2016)03-0212-07

Effect of SRB on Corrosion Behavior of X70 Pipeline Steel in Near-neutral pH Solution

SONG Boqiang, CHEN Xu, MA Guiyang, LIU Rui

School of Petroleum Engineering, Liaoning Shihua University, Fushun 113001, China

Abstract: The corrosion behavior of X70 pipeline steel in a near-neutral pH solution NS4 with and without sulfate-reducing bacteria (SRB) respectively was studied by means of electrochemical impedance spectroscopy (EIS), potentiodynamic polarization and microscopic observation. The results showed that the corrosion rate of X70 steel increased with time in NS4 solution without SRB; The growth process of the SRB in the solution NS4 can be divided into three phases: logarithmic phase (1~3 d), stable growth phase (4~7 d) and death phase (7~14 d). The influence of SRB on the corrosion rate of X70 pipeline steel in the solution NS4 with SRB was related to the growth process of SRB. A compact biological film could form on the steel surface in the stage of logarithmic phase and stable growth phase, which was conducive to enhancing the protectiveness of corrosion products on the steel and therewith the corrosion rate of X70 steel in the NS4 with SRB was lower than that without SRB. While the corrosion of X70 steel in the NS4 with SRB in the death phase was more serious than that without SRB, while the scale of corrosion products became thicker gradually, then the biological film broken and therewith the corrosion rate increased.

Key words: X70 pipeline steel, sulfate reducing bacteria, growth cycle, electrochemical corrosion

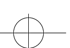
定稿日期：2015-08-24

基金项目：国家自然科学基金项目(51201009)和辽宁省自然科学基金项目 (2013020078) 资助

作者简介：宋博强，男，1990年生，硕士生

通讯作者：陈旭，E-mail：cx0402@sina.com，研究方向为金属材料腐蚀与防护

DOI：10.11902/1005.4537.2015.116



1 前言

微生物腐蚀 (MIC) 是材料腐蚀一个重要研究方向[1]。由于微生物导致的腐蚀约占地下金属腐蚀总量的80%[2]，造成的直接损失每年可达100亿美元[3]。MIC是由于微生物的生命活动参与所导致的金属材料腐蚀，其中最主要的是硫酸盐还原菌 (SRB) 引起的腐蚀[4]。SRB是一种厌氧型微生物，广泛存在于土壤、海水、河水以及地下管道和油气井等缺氧环境中。它可利用腐蚀微电池产生的H将硫酸盐还原成H_2S，从而导致腐蚀加速进行[5]。据统计，77%以上油井所发生的腐蚀均由SRB所引起，该腐蚀主要形貌是点蚀[6]。在液体环境中SRB会在金属表面形成一层生物膜，其主要成分是胞外高聚物 (EPS)[7]。随环境和微生物新陈代谢的变化生物膜对金属的腐蚀性也发生变化，或会对金属起到保护作用，或加速金属腐蚀[8]。现场研究[9]表明，在管道失效的剥离涂层下发现了SRB等微生物。但管线钢在剥离涂层下受微生物生长周期影响所导致的腐蚀的研究还很不充分。

本文以X70钢为研究对象、以剥离涂层下典型溶液环境—NS4溶液为实验介质，研究SRB生长周期对X70钢腐蚀行为的影响，探讨SRB对X70钢腐蚀行为作用机理。

2 实验方法

2.1 实验材料

本实验所用材料为X70管线钢，其化学成分 (质量分数，%) 为：C 0.045，Si 0.24，Mn 0.48，S 0.01，Cr 0.031，Al 0.01，P 0.017，Ni 0.16，Fe 余量。线切割X70管线钢尺寸为10 mm×10 mm×2 mm，用环氧树脂将试样密封，留出10 mm×10 mm的工作面积。试件表面采用水磨砂纸从80#依次打磨到1000#，用无水乙醇和丙酮拭除油污，用吹风机吹干待用。

金相试样打磨、机械抛光至1 μm，在光学显微镜 (OM) 下观察无明显划痕后，经4%(质量分数) 的硝酸酒精溶液浸蚀后的金相显微组织见图1。可知，X70钢的室温平衡组织均为铁素体+珠光体的双相组织。白色区域为铁素体，黑色区域为珠光体，晶粒比较细小，但有少量的大块铁素体。

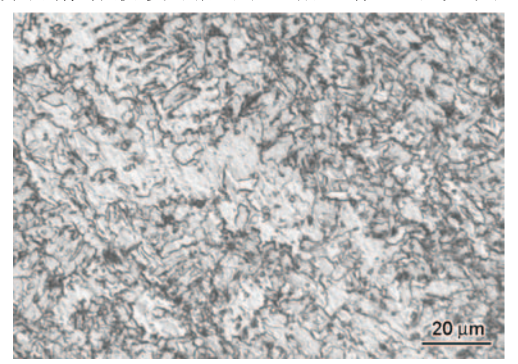


图1 X70钢的微观组织

Fig.1 Microstructure of X70 pipeline steel

2.2 实验溶液

实验所用的菌种为SRB，通过渤海海泥经过分离纯化后获得。液体培养基由培养基I和培养基II两部分组成。培养基I的成分为：0.5 g/L K_2HPO_4，0.5 g/L Na_2SO_4，1 g/L NH_4Cl，0.1 g/L $CaCl_2$，2 g/L $MgSO_4·7H_2O$，1 g/L 酵母粉，3 mL乳酸钠，用成分为4%(质量分数) NaOH溶液调节培养基pH值至7.2，在压力蒸汽灭菌器里消毒20 min，再静置冷却。培养基II的成分为：0.1 g/L 抗坏血酸+0.1 g/L 保险粉+0.1 g/L 硫酸亚铁铵。培养基II经圆筒式过滤器紫外线杀菌处理，再与冷却到室温的培养基I充分混匀，混合后的溶液即为液体培养基。

实验溶液为近中性pH值 (NS4) 溶液，溶液成分为：$NaHC0_3$ 0.483 g/L，KCI 0.122 g/L，$CaCl_2$ 0.137 g/L，$MgSO_4·7H_2O$ 0.131 g/L。溶液用分析纯试剂和去离子水配制。实验前将体积比为5%CO_2+95%N_2混合气通入NS4溶液除氧30 min，然后将其放置在压力蒸汽灭菌器里进行灭菌 (温度为121 ℃)，并经紫外灭菌15 min，以此溶液作为无菌介质。

液体培养基与无菌介质按1∶2的比例均匀混合，再将在恒温箱中培养至第4 d的纯菌SRB加入混合溶液，作为有菌介质，实验前通入体积比为5% CO_2+95%N_2混合气体继续除氧30 min。

2.3 SRB生长周期曲线

采用光密度测定法 (OD值法) 来绘制SRB在NS4溶液中的生长曲线。对有菌的近中性溶液每天进行提取，并用UV-2550紫外分光光度计进行吸光度 (Abs) 测定，由于吸光度在0.15~1.0的测试范围内与OD值近似，从而测得OD值，得到生长曲线。如果测出的OD值不在这个范围内，则菌液用液体培养基进行5倍稀释，至符合此范围。在最后的结果中与稀释倍数相乘即可。刚接入SRB时记为0 d，连续14 d观测OD值。

2.4 腐蚀形貌观察

将X70钢在无菌和有菌介质中分别浸泡4，7和14 d，将浸泡后的试件取出，在20%(质量分数)，50%，80%和100%的乙醇溶液中逐级脱水，然后用除锈液对试件表面进行处理，经丙酮和酒精擦拭并用吹风机吹干。在LEICA CT6000金相显微镜下观察浸泡后的试件形貌。

2.5 电化学实验

采用三电极体系，参比电极为饱和甘汞电极

(SCE)，辅助电极为石墨，工作电极为X70钢。在紫外灭菌箱内将三电极体系分别装到有菌溶液和无菌溶液中，将溶液做好密封使其隔绝空气。电化学实验在PAR2273电化学工作站完成。在14 d内每天测量X70钢在有、无SRB溶液中的开路电位E_{corr}；分别在1，4，7，10和14 d时对有、无SRB的近中性溶液中X70钢试件进行电化学阻抗 (EIS) 测量，测量频率为10^5~10^{-2} Hz，交流激励信号幅值为10 mV，实验结果利用ZSimpWin软件进行解析。在第4和7 d时对有、无菌介质中X70钢进行极化曲线测量，极化曲线扫描电位范围为-1.2~0 V，扫描速率为0.667 mV/s。本文中所有电位均相对于SCE。

3 结果与讨论

3.1 SRB生长曲线

SRB在NS4溶液中的生长曲线见图2。可知，SRB在近中性溶液中14 d内的生长大致可以分为3个级段：对数繁殖期 (1~3 d)，此阶段SRB迅速繁殖；稳定期 (4~7 d)，此阶段SRB繁殖和死亡速率基本相等，数量上呈平稳趋势；衰亡期 (7~14 d)，此阶段SRB进入了衰亡期，菌种大量死亡。

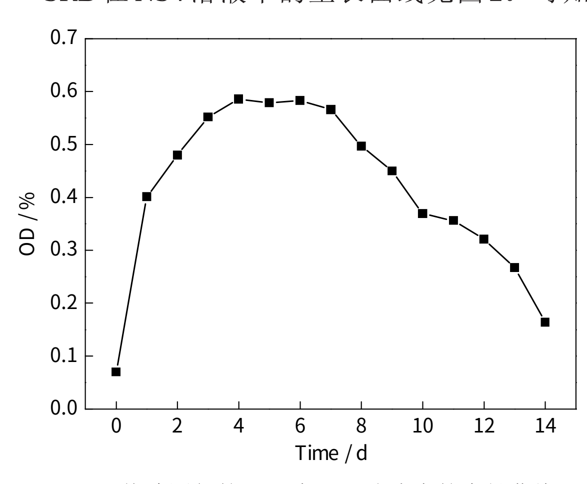


图2 OD值法测得的SRB在NS4溶液中的生长曲线

Fig.2 Growth chart determined by OD method for SRB in the solution of NS4

3.2 腐蚀形貌

图3为将X70钢在无菌和有菌介质中浸泡后去除表面腐蚀产物后的显微像。可以看出，在无菌介质中X70钢腐蚀主要以点蚀为主，随着浸泡时间的延长点蚀坑的直径和深度都逐渐增大，说明在无菌介质中随着时间的延长X70钢腐蚀程度逐渐变大。在有菌介质中浸泡4和7 d后，试件表面几乎没有被腐蚀的迹象，而浸泡到第14 d时试件表面出现了腐蚀坑，并且腐蚀坑的深度和密度都比无菌溶液中相同浸泡时间后的大。这表明在有菌介质中，X70钢表面生成了一层致密的生物膜 (其主要成分是胞外高聚物 EPS)，对X70钢起到了保护作用；在浸泡后期由于SRB的生命代谢和通入的CO_2产生的H^+对阴极去极化的促进作用，加速了X70钢的析氢腐蚀。CO_3^{2-}和SRB代谢产物S^{2-}与Fe^{2+}反应，使X70钢表面逐渐出现了SRB的代谢产物和FeS，$FeCO_3$等二次腐蚀产物[10]：

阳极反应：
$$4Fe \rightarrow 4Fe^{2+} + 8e \tag{1}$$

$$CO_3^{2-} + Fe^{2+} \rightarrow FeCO_3 \text{ (二次腐蚀产物)} \tag{2}$$

有菌参与的阴极反应：
$$SO_4^{2-} + 8H \rightarrow S^{2-} + 4H_2O \tag{3}$$

$$Fe^{2+} + S^{2-} \rightarrow FeS \text{ (二次腐蚀产物)} \tag{4}$$

X70钢表面从以生物膜为主逐步转变为以腐蚀

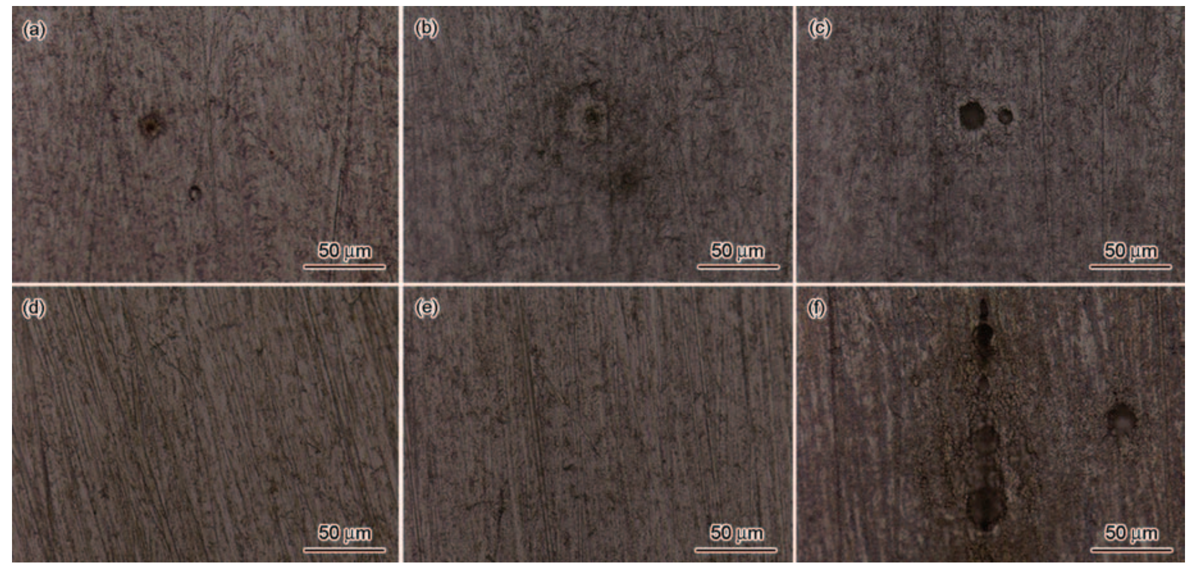


图3 X70钢在NS4溶液中浸泡不同时间除锈后的表面形貌

Fig.3 Surface morphologies of X70 steel after removal of the rust layers formed in NS4 solutions without (a~c) and with (d~f) SRB for 4 d (a, d), 7 d (b, e) and 14 d (c, f)

产物为主[10]，表面生物膜出现破裂，从而加速了腐蚀的进行[11]；同时，SRB的代谢产物与细菌细胞中的H_2S也会加快金属的腐蚀[12]。

3.3 开路电位

图4是X70钢在有、无SRB的近中性溶液中的开路电位随时间变化的曲线。可以看出，X70钢在无菌的近中性溶液中前2 d电位先从−510 mV快速负移至−745 mV，第2~5 d后电位基本稳定在约−755 mV，第5 d电位负移至−779 mV，之后电位稳定在该范围左右。无菌介质中电位先迅速负移表明，X70钢与溶液中残留的O_2发生吸氧腐蚀，O_2耗尽后电位趋于稳定，电位的第二次负移是由于随着浸泡天数的增加，试件表面发生了新的腐蚀反应。X70钢在含有SRB的NS4溶液中，电位先快速移至−780 mV，第2 d开始电位逐渐回升，第4~7 d平衡在约−730 mV，第8 d后电位又逐渐下降至−755 mV，随后基本保持稳定。X70钢在有菌介质中自腐蚀电位的变化与SRB生长曲线具有一致性，说明SRB对试样表面腐蚀产生影响：开始时X70钢电位负移，X70钢表面发生吸氧腐蚀，随着SRB进入稳定生长期，试样表面形成了均匀致密的生物膜和腐蚀产物膜，阻碍了界面传质，对金属起到了保护作用[13]，使阴阳极反应受阻，从而导致电位回升[10]。当SRB进入衰亡期，随着浸泡时间的增加，生物膜破裂，X70钢腐蚀产物膜变得松散且易脱落，使生物膜出现破裂，试件表面形成浓差电池[5]，从而促使金属再次腐蚀，电位下降。

3.4 电化学阻抗谱

图5为X70钢在无菌NS4溶液中的EIS谱。可以看出，X70钢在无菌的NS4溶液中的Nyqusit曲线为单一容抗弧，随着浸泡时间的延长阻抗模值逐渐减小。阻抗模值一般与金属耐蚀性呈正比，表明在

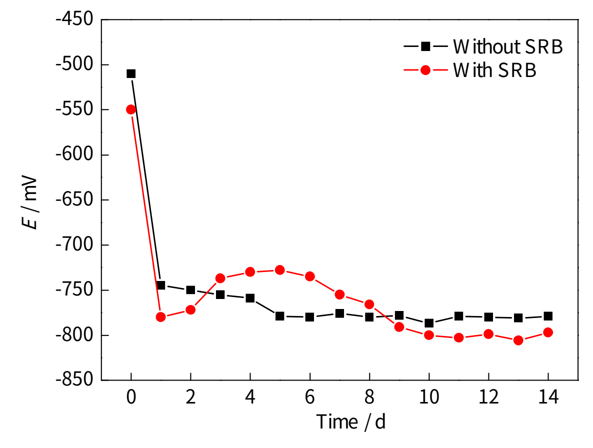


图4 X70钢在有、无菌介质中的自腐蚀电位随时间的变化曲线

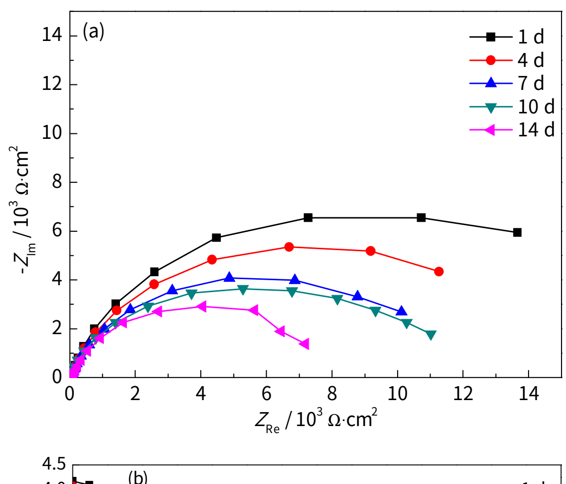
Fig.4 Evolutions of open circle potential of X70 steel in NS4 solutions with and without SRB

无菌溶液中，X70钢的腐蚀随时间增加逐渐严重。图5b的Bode图表现为一个时间常数，说明X70钢表面发生单一腐蚀反应。

图6为X70钢在有SRB的NS4溶液中的电化学阻抗谱。由图6a可以看出，X70钢在有SRB的近中性溶液中，Nyqusit曲线半径在第1，4和7 d逐渐变大，第10 d减小，第14 d最小。从图6b的Bode图和相位角图可以看出，在有SRB的影响时第1和4 d表现为一个时间常数，第7，10和14 d表现为两个时间常数，表明在1~4 d时X70钢的表面被生物膜覆盖，随着浸泡时间的延长，腐蚀产物膜逐渐变厚增多，微生物膜破裂，X70钢的表面膜由生物膜和腐蚀产物膜共同组成。

采用图7等效电路图，用ZSimpWin软件对无菌和有菌时的EIS结果进行拟合。其中R_s为溶液电阻，Q_{dl}为双电层电容，n_{dl}表示双电层电容指数，R_t为电荷转移电阻，Q_f为膜的电容，n_f表示膜的电容指数，R_f为膜层电阻。拟合结果见表1。

从表1的数据可以看出，在无菌情况下，R_t随浸泡时间的延长呈逐渐下降的趋势，表明腐蚀程度在



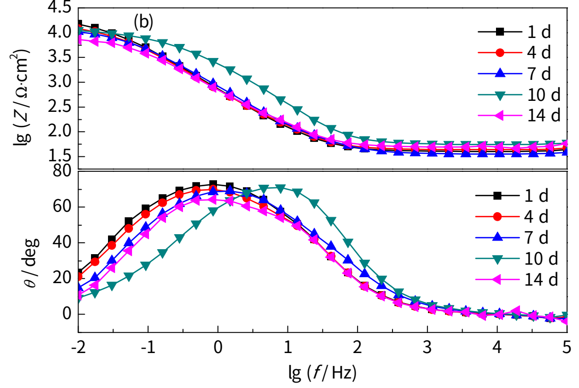
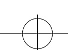


图5 X70钢在无菌介质中浸泡不同时间的Nyqusit图和Bode图

Fig.5 Nyqusit (a), Bode and phase angle (b) plots of X70 steel immersed in NS4 solution without SRB for different time



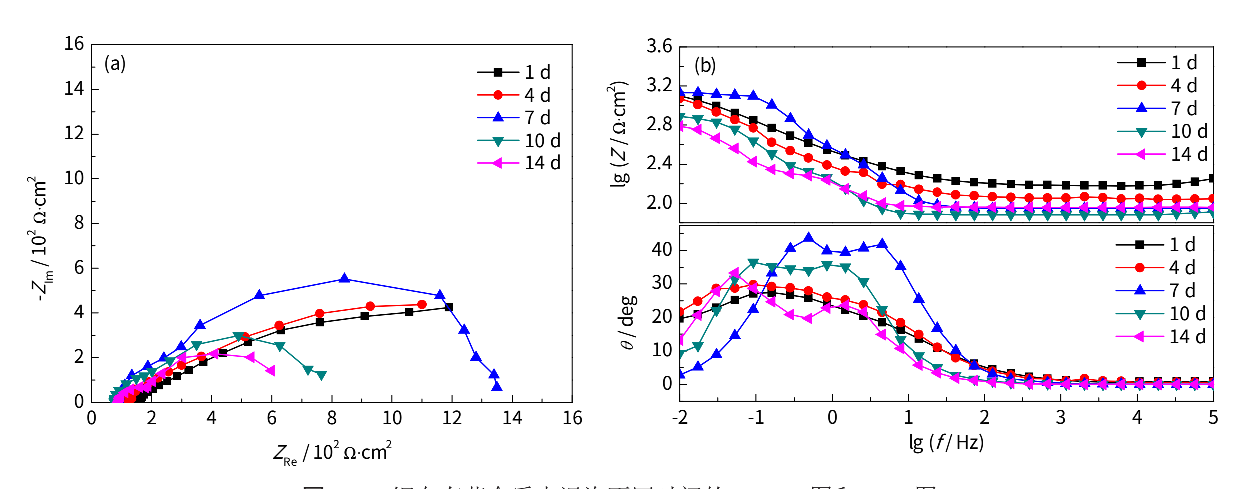


图6 X70钢在有菌介质中浸泡不同时间的Nyqusit图和Bode图

Fig.6 Nyqusit (a), Bode and phase angle (b) plots of X70 steel immersed in NS4 solution with SRB for different time

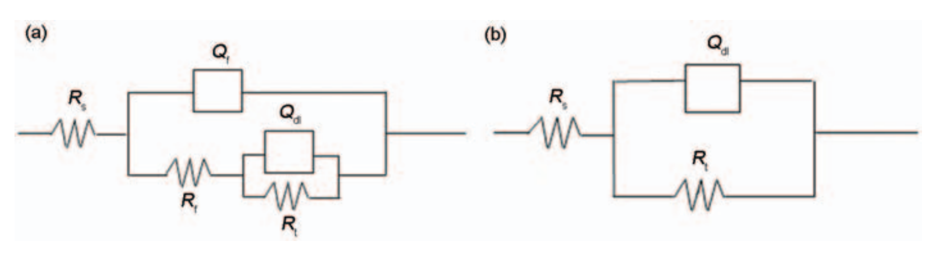


图7 有、无菌浸泡不同时间等效电路

Fig.7 Equivalent circuits for EIS of X70 steel during immersion in NS4 solutions with (a) and without (b) SRB

表1 X70钢在有菌和无菌介质中的电化学参数随浸泡时间的变化

Table 1 Fitting electrochemical parameters for X70 steel after immersed in NS4 solutions with SRB and without SRB for different time

Condition	Time / d	R_s / Ω·cm²	Q_f / μF·cm⁻²	n_f	R_f / Ω·cm²	Q_{dl} / μF·cm⁻²	n_{dl}	R_t / Ω·cm²
Without SRB	1	40.96	---	---	---	2.859×10^{-4}	0.8455	1.7×10^{4}
	4	43.86	---	---	---	3.021×10^{-4}	0.8232	1.4×10^{4}
	7	36.35	---	---	---	2.659×10^{-4}	0.8118	1.1×10^{4}
	10	55.21	---	---	---	0.8366×10^{-4}	0.8562	1.03×10^{4}
	14	49.66	---	---	---	3.072×10^{-4}	0.8016	8.1×10^{3}
With SRB	1	155.8	17.77×10^{-4}	0.46	1.192	0.61×10^{-4}	1	1.2×10^{3}
	4	117.9	2.646×10^{-4}	1	69.08	26.39×10^{-4}	0.6047	1.6×10^{3}
	7	88.93	2.408×10^{-4}	1	337.3	7.843×10^{-4}	1	926
	10	76.75	10.52×10^{-4}	1	198.3	48.18×10^{-4}	1	500
	14	91.1	12.07×10^{-4}	1	125.2	114.6×10^{-4}	1	425

增加。在有菌情况下，R_f和R_t基本都随浸泡时间的延长呈先增加后快速下降的趋势，这说明X70钢的耐蚀性先增加后下降[14]; R_f在第1~7 d (对数繁殖期和稳定期) 呈增大趋势，表明此时试件表面会覆盖一层致密的生物膜；在第7~14 d (衰亡期) 呈减小趋势，表明试件表面的生物膜破裂。

结合图2中的曲线可以发现，SRB在近中性溶液中对X70钢腐蚀的影响规律与SRB在近中性溶液中的生长规律大致相符，在SRB的对数繁殖期和稳定期试件表面受到保护，耐蚀性好；在SRB的衰亡期时腐蚀程度增加。所以SRB在近中性溶液中的生长周期对X70钢的腐蚀有着规律性的影响。

3.5 极化曲线

图8是X70钢在无菌和有菌的近中性溶液中浸泡4和14 d的极化曲线。对极化曲线进行拟合，结果见表2。

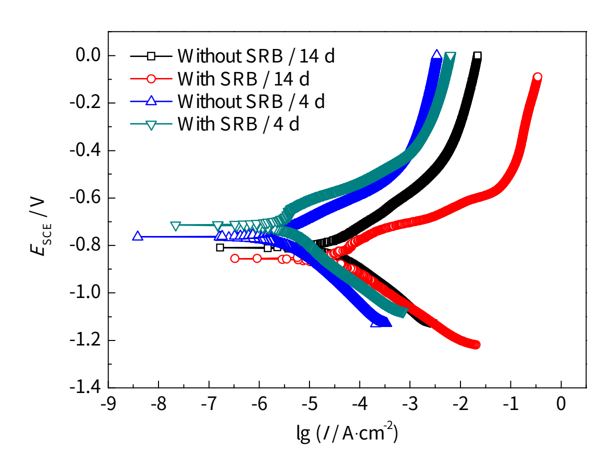


图8 X70钢在NS4溶液中浸泡不同时间的极化曲线

Fig.8 Polarization curves of X70 steel after immersion in NS4 solutions for different time

表2 极化曲线的拟合结果

Table 2 Fitting results of the potentiodynamic polarization curves

Condition	E_{corr} / mV	I_{corr} / μA·cm^{-2}
Without SRB / 4 d	−754.8	3.432
With SRB / 4 d	−721.0	1.856
Without SRB / 14 d	−813.9	21.151
With SRB / 14 d	−856.0	30.650

从极化曲线和拟合结果可以看出，第4 d时有菌的腐蚀电位E_{corr}比无菌时正，腐蚀电流密度I_{corr}相比无菌4 d时的小，这是由于在浸泡初期X70钢在有SRB菌的近中性溶液中电极表面会形成一层致密的生物膜和腐蚀产物膜，对X70钢起到保护作用。浸泡到第14 d时，有、无菌介质中的E_{corr}都要低于第4 d时的，腐蚀电流密度I_{corr}都大于第4 d时的，说明无论有菌还是无菌介质第14 d的腐蚀程度相比第4 d都有明显增加；且阴、阳极曲线都有所右移，斜率也有所减小，说明发生了阴极去极化和阳极去极化，从而加速了腐蚀的进行。就第14 d而言，有菌的腐蚀电位比无菌的低，腐蚀电流密度又高于无菌的，而且阳极曲线斜率减小，发生了阳极去极化，X70钢的极化行为表明SRB的代谢产物与细菌细胞中的H_2S会加快金属的腐蚀[15]。结合SRB在NS4溶液中的生长周期发现，SRB在NS4溶液中的对数繁殖期和稳定期对应着X70钢在有菌介质中腐蚀速率降低的时期，SRB在NS4溶液中的衰亡期对应X70钢加速腐蚀的时期，最终由于SRB的存在会使X70的腐蚀相比无菌介质条件下的要严重得多。

4 结论

(1) SRB在近中性溶液 (NS4) 中的生长分为3个阶段：对数繁殖期 (1~3 d)，稳定期 (4~7 d) 和衰亡期 (7~14 d)。

(2) X70钢在有、无菌NS4溶液中腐蚀形貌均为点蚀。在无菌介质中，X70钢腐蚀程度随着浸泡时间的增加而增加。

(3) 在含SRB的NS4溶液中，X70钢的腐蚀速率的变化与SRB在NS4溶液中的生长规律有关：在对数繁殖期和稳定生长期，X70钢表面覆盖一层致密的生物膜，对电极起到了保护作用，使腐蚀速率减小；在衰亡期，生物膜破裂导致X70钢腐蚀速率快速增大。

(4) 在NS4溶液中，当SRB处于对数繁殖期和稳定期时，X70钢的腐蚀速率比无菌介质中的低；当SRB处于衰亡期时，X70钢的腐蚀速率比无菌介质中的高。

参考文献

[1] Xia S H, Qi M Y, Li J X. Corrosion mechanism of MIC and influences on corrosion and protection of underground pipeline [J]. Total Corros. Control, 2005, 19(3): 27
(夏双辉, 戚明友, 李建秀. 微生物腐蚀机理及对埋地管道腐蚀防护的影响 [J]. 全面腐蚀防制, 2005, 19(3): 27)

[2] Zhang Y, Li Y. Microbiological corrosion and protection of oil and gas pipeline [J]. Equip. Environ. Eng., 2008, 5(5): 45
(张燕, 李颖. 输油气管线的微生物腐蚀与防护 [J]. 装备环境工程, 2008, 5(5): 45)

[3] Matilde F R, Junire P, Rosemary R. Cathodic polarization effect on sessile SRB growth and iron protection [A]. Corrosion/2006 [C]. Las Vegas, 2006: 06526

[4] Graves J W, Sullivan E H. Internal corrosion in gas gathering systems and transmission lines [J]. Mater. Prot., 1996, 5: 33

[5] Zhao L C, Sun C, Zhang F B, et al. Kinetics analysis of naphthenic acid corrosion in atmospheric and vacuum equipment [J]. Corros. Sci. Prot. Technol., 2007, 19(1): 27
(赵力成, 孙成, 张付宝等. SRB对X70管线钢在污染土壤中腐蚀行为的影响 [J]. 腐蚀科学与防护技术, 2007, 19(1): 27)

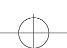
[6] Zhu R X, Na J Y, Guo S W, et al. The corrosion mechanism of sulfate reducing bacteria [J]. J. Air Force Eng. Univ. (Nat. Sci. Ed.), 2000, 1(3): 10
(朱绒霞, 那静彦, 郭生武等. 硫酸盐还原菌的腐蚀机理 [J]. 空军工程大学学报 (自然科学版), 2000, 1(3): 10)

[7] Souad B, Mohamed A L, Samir H. Effect of biofilm on naval steel corrosion in natural seawater [J]. J. Solid State Electrochem., 2011, 15(3): 525

[8] Fan Y J, Pi Z B, Hua P, et al. Microbial corrosion and its research methods [J]. Mater. Prot., 2001, 34(5): 28

[9] Jia S Y, Sun C, Wang J, et al. Research on corrosion of pipeline steel beneath disbanded coatings [J]. Corros. Sci. Prot. Technol., 2007, 19(3): 211
(贾思洋, 孙成, 王佳等. 剥离涂层下管线钢腐蚀研究进展 [J]. 腐蚀科学与防护技术, 2007, 19(3): 211)

[10] Liu W, Zhao Y L, Lu M X. Corrosion electrochemical characteris-



tics of X60 pipeline steel in SRB and CO_2 coexistence environment [J] Acta Phys.-Chim. Sin., 2008, 24(3): 393
(柳伟, 赵艳亮, 路民旭. SRB和CO_2共存环境中X60管线钢腐蚀电化学特征 [J]. 物理化学学报, 2008, 24(3): 393)

[11] Li J, Xu Z Y, Du Y L, et al. Influence of sulfate reducing bacteria on corrosive electrochemical behavior of copper alloy [J]. J. Chin. Soc. Corros. Prot., 2007, 27(6): 342
(李进, 许兆义, 杜一立等. 硫酸盐还原菌对铜合金腐蚀电化学行为的影响 [J]. 中国腐蚀与防护学报, 2007, 27(6): 342)

[12] Yuan H T, Gong A J, Gao J, et al. The research progress of SRB microbial corrosion and protection [J]. Chem. Bioeng., 2009, 5(1): 11
(苑海涛, 弓爱君, 高瑾等. 硫酸盐还原菌的微生物腐蚀及其防护研究进展 [J]. 化学与生物工程, 2009, 5(1): 11)

[13] Li F Z, An M Z. The effect of SRB biofilm in the process of stainless steel corrosion [J]. Mater. Prot., 2012, 45(1): 27
(李付绍, 安茂忠. 硫酸盐还原菌生物膜在不锈钢腐蚀过程中的作用 [J]. 材料保护, 2012, 45(1): 27)

[14] Liu T, Chen X, Zhang Y F, et al. Effect of SRB on corrosion behavior of X70 steel in a simulated soil solution [J]. J. Chin. Soc. Corros. Prot., 2014, 34(2): 113
(刘彤, 陈旭, 张艳飞等. SRB对X70钢在土壤模拟溶液中腐蚀行为的影响 [J]. 中国腐蚀与防护学报, 2014, 34(2): 113)

[15] Chen X, Wu M. Effect of applied potential on SCC of X80 pipeline steel and its weld joint in Ku'erle soil simulated solution [J]. Acta Metall. Sin., 2010, 46(8): 951
(陈旭, 吴明. 外加电位对X80钢及其焊缝在库尔勒土壤模拟溶液中SCC行为的影响 [J]. 金属学报, 2010, 46(8): 951)

